

基于 FPGA 的 Separable Gabor 滤波器设计

席诗琼, 韩 胜, 刘远泽, 耿卫东

(南开大学 光电子薄膜器件与技术研究所 光电子薄膜器件与技术天津市重点实验室,
光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300350)

摘 要: 指纹图像滤波是指纹图像增强耗时最大的过程, 为提高指纹滤波的实时性, 提出了一种 Separable Gabor 滤波器, 将二维的 Gabor 滤波器分别拆分为一维带通滤波器和一维低通滤波器. 两种滤波器在互相垂直的方向上分别对指纹图像进行卷积. 该算法用硬件描述语言在可编程逻辑门阵列 (FPGA) 上实现. 为了节省存储空间, 引入了坐标变换和方向变换. 实验结果表明, 对于同一幅指纹图像, Separable Gabor 滤波器和 Gabor 滤波器的处理结果相似, 且前者的处理速度是后者的 1.9 到 4 倍, 存储空间的消耗仅为 Gabor 滤波器的 16.4%, 提高了滤波速度的同时极大的降低了硬件成本.

关键词: 指纹; 图像增强; Separable Gabor 滤波器; FPGA

中图分类号: TP33

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2018)12-0080-05

Design of Separable Gabor Filter Based on FPGAs

XI Shi-qiong, HAN Sheng, LIU Yuan-ze, GENG Wei-dong

(Key Laboratory of Photo-Electronics Thin Film Devices and Technique of Tianjin,
Key Laboratory of Opto-electronic Information Science and Technology,
Ministry of Education, Institute of Photo-electronics Thin Film Devices and Technique,
Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: Fingerprint image filtering is the most time-consuming process of fingerprint image enhancement. In order to improve the real-time performance of fingerprint filtering, a Separable Gabor filter is proposed. The two-dimensional Gabor filter is split into a one-dimensional band-pass filter and a one-dimensional low-pass filter. Two filters respectively convolute the fingerprint image in mutually perpendicular directions. The algorithm is realized on FPGA using hardware description language. In order to save memory space in the implementation process, coordinate transformation and direction transformation were introduced. Experimental results show that for the same fingerprint image, the processing results of the Separable Gabor filter and the Gabor filter are similar, and the former is 1.9 to 4 times faster than the latter, the consumption of memory space of the Separable Gabor filter is only 16.4% of the Gabor filter. Increases the filtering speed while greatly reducing hardware costs.

Key words: image enhancement; separable gabor filter; FPGA

1 引言

随着信息技术的发展和人们对各类系统安全性能的提高, 指纹识别等生物特征识别技术受到广泛关注. 虽然指纹识别技术已逐步走向应用, 但在非理想条件下, 由于手指的皮肤状况(过干或过湿), 传感

器噪声和伤疤等原因, 有相当一部分的指纹图像质量较低. 这对指纹特征点的提取就造成了一定的困难. 利用图像增强技术改善指纹图像的结构清晰度, 在指纹识别过程中就显得十分重要^[1-2]. 常用的指纹增强方法有 Gabor 滤波、Separable Gabor 滤波、高斯滤波等. 这些方法本质上都是卷积运算, 运算量和

吞吐率都相当大. 利用硬件电路和并行处理方法实现指纹增强的实时处理受到人们关注^[3].

Razak^[4]等提出 Gabor 滤波的硬件加速方案, 滤波方向只有 8 个, 且频率被固定在 1/6. 虽然减少了存储空间, 但是牺牲了滤波精度. Fons^[5]等虽然增加了滤波方向的精度, 但是滤波核大小固定, 不能适应不同频率的指纹图像. 刘俊宝^[6]等提出的 Gabor 滤波器硬件设计方案, 考虑了指纹纹线的所有方向, 滤波器有 5 个尺寸可选, 具有很好的灵活性. 其流水 CORDIC 单元也进一步保证了三角函数的计算精度. 但是计算三角函数的计算非常耗时, 处理图像时速度较慢. Khan^[7]等提出的基于 FPGA 的各向异性高斯滤波器, 虽然滤波方向与脊线方向一直, 且提高了滤波速度, 但是忽略了脊线频率这一重要信息.

本文结合 FPGA 芯片的特点, 对 Separable Gabor 滤波方法进行研究, 提出了一种基于 Separable Gabor 的硬件加速方法. 滤波器考虑了指纹纹线的所有方向, 尺寸能够根据指纹纹线的频率 1/5 到 1/13 可选, 与 Gabor 滤波器的硬件加速方案相比, 处理结果相似, 同时可大幅减少计算时间和存储空间.

2 Separable Gabor 滤波器

指纹图像的方向和频率能够为移除噪声提供有用的信息. 在局部特定的方向上, 脊和谷的正弦波形变化十分缓慢. 因此, 调整到相应的频率和取向的滤波器可以有效地去除不期望的噪声并保护真正的脊和谷结构. 由于 Gabor 函数非常贴合指纹图像的周期性, 所以能够直观地表示指纹图像, 是目前最为流行的指纹增强方法.

Gabor 滤波器可表示为^[8]:

$$h(x, y; \phi, f) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x_\phi^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\phi^2}{\sigma_y^2}\right]\right\} \cos(2\pi f x_\phi) \quad (1)$$

$$x_\phi = x \cos \phi + y \sin \phi \quad (2)$$

$$y_\phi = -x \sin \phi + y \cos \phi \quad (3)$$

式中, ϕ 表示 Gabor 滤波的方向; f 为正弦波的频率; σ_x 和 σ_y 分别为高斯函数沿着 x 轴和 y 轴的标准差; $[x_\phi, y_\phi]$ 是笛卡尔坐标系顺时针旋转 $(90^\circ - \phi)$ 后的 $[x, y]$ 坐标.

在指纹识别过程中, Gabor 滤波是计算量非常大的过程之一, Separable Gabor 把二维的 Gabor 滤波器在互相垂直的方向上分别拆分为一维带通滤波

器和一维低通滤波器, 大幅减少运算量, 使得计算复杂度降低, 同时提高滤波速度.

一维低通滤波器可表示为^[9]:

$$G_{LP}(y) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right\} \quad (4)$$

一维带通滤波器可表示为:

$$G_{BP}(x, f_0) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x^2}{\sigma_x^2}\right)\right\} \cos(2\pi f_0 x) \quad (5)$$

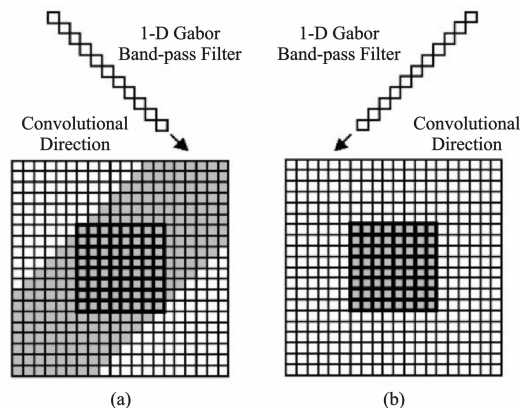


图1 两个一维滤波器滤波过程

如图 1 所示, 在滤波时, 分别用两个一维滤波器对指纹图像卷积, 对于第一个一维滤波器, 先对大于目标图像块的图像进行卷积, 以获得如图 1(a) 所示的滤波结果. 在这基础上, 另一个一维滤波器在垂直方向上卷积, 最后得到如图 1(b) 所示的滤波结果.

3 Separable Gabor 的 FPGA 实现

本设计所使用的硬件设备为 Altera 公司的 DE1-SoC 开发板, 其核心芯片为 Cyclone V 5CSEMA5F31. 选择其内嵌的 ARM Cortex-A9 硬核作为系统控制模块, 负责主要的处理算法和时序控制信号的产生.

由于滤波耗时较大, 因此专门为其设计了硬件加速单元, 其他步骤全部由处理器完成, 如归一化、方向和频率计算、细化和匹配等.

3.1 滤波器的形成

由式(4)、(5)可知, 一维滤波器与 x 或 y 有关, x 和 y 均表示被卷积像素点与待滤波像素点之间的距离. 在实际滤波时, 这一距离 d 并不是连续的, 也并不总是整数. 因此需要重新生成滤波器和重采样的过程.

$$d = n / \cos \theta \quad (6)$$

离散的一维滤波器可表示为:

$$G_{LP}(n, \theta) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{n^2}{(\sigma_x \cos \theta)^2}\right)\right\} \quad (7)$$

$$G_{BP}(n,\theta) = exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{n^2}{(\sigma_x cos\theta)^2}\right)\right\}cos\left(\frac{2\pi f_0 n}{cos\theta}\right)$$

(8)

本文采用 FPGA 实现 Separable Gabor 滤波器,并将滤波器与图像像素卷积.在设计滤波器和计算待滤波像素点位置时,频繁的用到指数函数和正弦、余弦函数,加大了运算量.为了加快运算速度,本文使用 ROM 来存储可用到的数据.为减少存储空间,根据余弦函数的特性,在对滤波器进行寻址时,将脊线方向原本的取值范围 $[0^\circ,180^\circ]$ 映射到 $[0^\circ,45^\circ]$,具体方法见表 1.

表 1 坐标变换和方向调整

脊线方向(θ)	坐标变换	寻址方向(α)
$[0^\circ,45^\circ]$	$x \rightarrow x, y \rightarrow y$	$\alpha = \theta$
$[45^\circ,90^\circ]$	$x \rightarrow y, y \rightarrow x$	$\alpha = 90^\circ - \theta$
$[90^\circ,135^\circ]$	$x \rightarrow y, y \rightarrow -x$	$\alpha = \theta - 90^\circ$
$[135^\circ,180^\circ]$	$x \rightarrow -x, y \rightarrow y$	$\alpha = 180^\circ - \theta$

由式(7)可知,一维低通滤波器仅与 n 和 θ 相关, $y \in [-f,f], \theta \in [0^\circ,45^\circ], \sigma_y$ 为定值.故只需要知道 n 与 θ 的值,就可以查出 $G_{LP}(n,\theta)$ 的值.同样的,由式(8)可知,一维带通滤波器与 n, θ 和 f 相关,故只需要知道 n, f 与 θ 的值,就可以查出 $G_{BP}(n,f,\theta)$ 的值.

由于 Separable Gabor 滤波器的取值范围在 -0.5 到 0.5 之间,在应用于硬件实现之前需要对其做相应的扩展并将扩展结果以二进制补码的形式保存在 ROM 中.考虑到之后要进行移位的处理操作,其扩展倍数一般为 $2n$,这就导致无论 n 取多少,扩展结果始终会出现小数,在取整过程中会被舍弃.此外,卷积完成后,又需要将所得结果做移位处理,将低位舍去,如此两次的取舍工作,势必会对其计算精度造成影响.为确保计算精度,本文将 Separable Gabor 滤波器的值扩大 1024 倍.

在对指纹图像进行 Separable Gabor 滤波时,为了使滤波器更加贴合指纹图像的周期性,需要依据指纹频率选择不同尺度不同方向上的 Separable Gabor 滤波器.本文设计的滤波器包含 5 个尺度(滤波器宽度分别为:5、7、9、11、13),15 个原始方向($0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, \dots, 42^\circ$),经方向变换后,滤波器方向有 60 个($0^\circ, 3^\circ, 6^\circ, \dots, 177^\circ$).因为 Separable Gabor 低通滤波器组只涉及滤波方向的选择,所以在保存低通滤波器时,将所有方向都按最大尺度保存,在读取时,按照实际滤波宽度读取滤波器组.

3.2 像素点位置计算

对于一维低通滤波器,指纹图像像素点的寻址方向沿着脊线方向,一维带通滤波器的像素点寻址方向则与脊线方向垂直.然而沿着一维滤波器的采样线,像素点可能不存在,本文采用的方法是对图像进行插值,来估计沿采样线上缺失的像素.如图 2 所示,以被处理像素点为原点建立直角坐标系,方形网格的交点表示像素点所在位置,斜线表示滤波方向.本文采用最近邻域插值的方法来估计缺失点像素,三角形表示需要插值的位置,用圆形所在位置的像素代替三角形处的像素值. d_1 表示 n 等于 1 时待滤波像素点到采样点的距离,即 n 等于 1 时的 d .

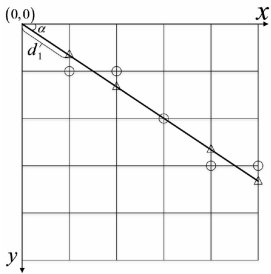


图 2 最近邻域差值

当滤波方向 $\alpha \in [0^\circ,45^\circ]$ 时,被寻址像素点相对待滤波像素点的位置为 $[n, INT(n * tan\alpha)]$.

为节省存储空间,寻址时 α 的取值范围为 $[0^\circ,45^\circ]$,在使用滤波器时需要将 x, y 轴进行坐标变换,并在寻址 ROM 时对方向进行调整.调整方法见表 1.为保证计算精度,将 $tan\alpha$ 的值扩大 1024 倍存入 ROM,在寻址时,将 $n * tan\alpha$ 的值右移 10 位,即可实现取整.

读像素寻址电路如图 3 所示.

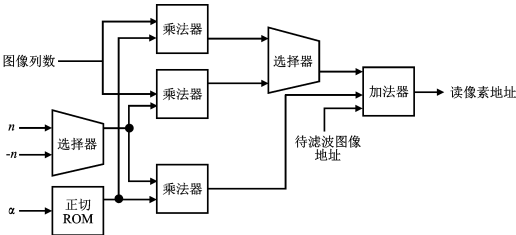


图 3 寻址电路

3.3 滤波

Separable Gabor 滤波本质上是进行一系列的一维卷积运算,即用一个系数模板与其所覆盖的相应位置上的像素作乘加运算,得到的是卷积像素中间位置的卷积结果.将模板遍历整个原始图像之后,即可得到最终的卷积结果.假设滤波器宽度为

(2n+1),在不同的寻址方向下,计算公式如表 2 所示:

表 2 不同寻址方向下的滤波计算	
寻址方向(α)	滤波计算公式
$\alpha \in [0^\circ, 45^\circ]$	$r_{x,y} = \sum_{k=-n}^n f_k \times p_{x+n,y+INT(n\tan\alpha)}$
$\alpha \in [45^\circ, 90^\circ]$	$r_{x,y} = \sum_{k=-n}^n f_k \times p_{x+INT(n\tan\alpha),y+n}$
$\alpha \in [90^\circ, 135^\circ]$	$r_{x,y} = \sum_{k=-n}^n f_k \times p_{x-INT(n\tan\alpha),y+n}$
$\alpha \in [135^\circ, 180^\circ]$	$r_{x,y} = \sum_{k=-n}^n f_k \times p_{x-n,y+INT(n\tan\alpha)}$

f_k 为滤波器的值, $p_{x,y}$ 为原始图像像素值, $r_{x,y}$ 为卷积结果.

由于滤波器有一定的宽度,所以处在图像边缘的像素将不被处理. 为加强滤波效果,在滤波时,先用一维低通滤波器沿着指纹脊线方向对整幅图像进行卷积,得到低通滤波后的图像. 再用一维带通滤波器在与指纹脊线方向垂直的方向对低通滤波图像进行卷积,即可得到最终滤波后的图像.

滤波电路如图 4 所示

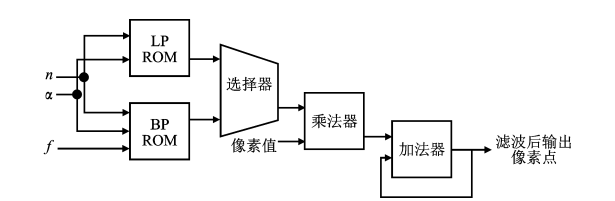


图 4 Separable Gabor 滤波卷积单元的实现

4 实验结果与分析

本文对灰度值为 0~255,大小为 256×256 像素的指纹图像分别用 Separable Gabor 滤波器和 Gabor 滤波器进行处理. 如图 5 所示,(a)为原始指纹图像,(b)为用本文方法处理的图像,(c)为 Gabor 滤波器处理的图像. 可以看出,两种方法得到的滤波结果十分相似.

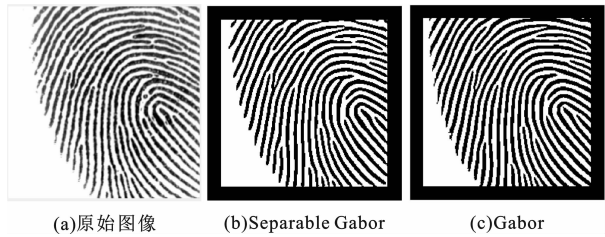


图 5 两种方法处理结果

由于需要存储滤波器和一些三角函数的值, Gabor 滤波器消耗存储空间 157 056 bit,Separable

Gabor 滤波器消耗存储空间 51 040 bit,仅为 Gabor 滤波器的 32.5%.

在 250 MHz 频率下,当滤波器宽度分别为 7、9、11、13 时,两种方法消耗时间如表 2 所示. 同时将 PC(2.3 GHz Core i5 CPU,4 GB 内存)上使用 Matlab 用 Separable Gabor 方法的计算结果也加入表 2 进行了对比.

由表 3 可知,在 FPGA 上 Separable Gabor 的滤波速度是 Gabor 的 1.9 到 4 倍,随着滤波器宽度的增加,这一优势越来越明显. 这是因为当滤波器宽度为 m 时,每处理一个像素点, Gabor 滤波需要完成 $m \times m$ 次乘法运算以及 $m \times m - 1$ 次加法运算,而 Separable Gabor 只需要完成 $2 \times m$ 次乘法运算和 $2 \times nm - 1$ 次加法运算. 前者的运算量约为后者的 $m/2$ 倍,因此,随着滤波宽度的增大,Separable Gabor 的滤波器的优势越来越明显.

表 3 测试结果

滤波器宽度	7	9	11	13
Separable Gabor	7.51 ms	8.25 ms	8.93 ms	9.55 ms
Gabor	14.31 ms	21.14 ms	29.25 ms	38.48 ms
PC	229.7 ms	251.2 ms	258.3 ms	282.9 ms
时间之比 (Gabor/Separable Gabor)	1.91	2.56	3.28	4.03

5 结束语

本文提出了一种适用于指纹图像增强的 Separable Gabor 滤波器的硬件设计与实现方案. 该方法利用指纹纹线的方向和频率信息,能够实现指纹图像的增强. 实验结果表明,用硬件加速的方法可以大幅提高运算速度. 与 Gabor 滤波器相比,Separable Gabor 滤波器的滤波速度是 Gabor 滤波器的 1.9 到 4 倍,且消耗的存储空间仅为 Gabor 滤波器的 32.5%. 进一步提高了指纹增强的实时性,同时节省了存储空间.

参考文献:

[1] 丁亮,苏光大. Gabor 滤波算法在邻域处理器中的实现[J]. 微电子学与计算机,2011,28(2):33-36.

[2] Khan T M, Bailey D G, Khan M A U, et al. Efficient hardware implementation strategy for local normalization of fingerprint images[J]. Journal of Real-Time Image Processing, 2016:1-13.

[3] Alilla A, Faccio M, Vali T, et al. A new low cost fingerprint recognition system on FPGA[C]// IEEE In-

- ternational Conference on Industrial Technology. Cape Town, South Africa. IEEE, 2013:988-993.
- [4] Razak A H A, Taharim R H. Implementing Gabor Filter for fingerprint recognition using Verilog HDL [C]// International Colloquium on Signal Processing & ITS Applications. Kuala Lumpur, Malaysia. IEEE, 2009:423-427.
- [5] Fons M, Fons F, Cantó E, et al. FPGA-based Personal Authentication Using Fingerprints[J]. Journal of Signal Processing Systems, 2012, 66(2):153-189.
- [6] 刘俊宝,李毅,韩军,等. 面向指纹图像增强的 Gabor 滤波器设计[J]. 计算机工程, 2012, 38(18):130-132.
- [7] Khan T M, Bailey D G, Khan M A U, et al. Efficient Hardware Implementation For Fingerprint Image Enhancement Using Anisotropic Gaussian Filter [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(5):2116-2126.
- [8] Hong L, Wan Y, Jain A. Fingerprint image enhancement: algorithm and performance evaluation [M]. IEEE Computer Society, 1998.
- [9] Areekul V, Watchareeruetai U, Suppasriwasuseth K, et al. Separable Gabor filter realization for fast fingerprint enhancement[C]// IEEE International Conference on Image Processing. Genova, Italy. IEEE, 2005:III-253-6.

作者简介:

席诗琼 女,(1992-),硕士研究生. 研究方向为混合信号集成电路、模式识别.

韩 胜 男,(1992-),硕士研究生. 研究方向为混合信号集成电路、模式识别.

刘远泽 男,(1989-),博士研究生. 研究方向为数字集成电路

耿卫东(通讯作者) 男,(1955-),教授,博士生导师. 研究方向为平板显示技术与混合信号集成电路设计研究.

E-mail:gengwd@nankai.edu.cn

(上接第 79 页)

- [7] 巫文佳,何旭. 基于粒关联规则的冷启动推荐方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(3):71-75.
- [8] 丁晶,赵永龙. 以互信息为基础的广义相关系数[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002, 34(3):1-5.
- [9] 刘宇轩. 混合协同过滤算法研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2013.
- [10] 高凤荣,杜小勇,王珊. 一种基于稀疏矩阵划分的个性化推荐算法[J]. 微电子学与计算机, 2004, 21(2):58-62.

作者简介:

郑 诚 男,(1964-),博士,副教授. 研究方向为数据挖掘、自然语言处理、人工智能、信息检索.

徐启南(通讯作者) 男,(1991-),硕士研究生. 研究方向为数据挖掘、自然语言处理、信息检索.

E-mail:1850889412@qq.com.

章金平 女,(1991-),硕士研究生. 研究方向为数据挖掘、自然语言处理、信息检索.